

# 有限要素法による支台築造歯の応力解析 －レジンコアにおけるポスト材料の影響－

佐藤 剛

明海大学歯学部機能保存回復学講座歯科補綴学分野  
(指導：藤澤政紀教授)

Finite Element Analysis of Stress Distributions in  
an Abutment Tooth Restored with Post-and-Core  
－ Influences of Post Materials used with Composite  
Resin Core Restorations –

Goh SATOH

Division of Fixed Prosthodontics,  
Department of Restorative & Biomaterials Sciences,  
Meikai University School of Dentistry  
(Mentor: Prof. Masanori FUJISAWA)

## 要 旨

支台築造歯に生じる応力の力学的検討を行うため，三次元有限要素法による解析を行った．支台歯形態としてフェルールのあるモデル（F）とないモデル（NF）を構築し，築造体は金属ポスト併用（MP）とファイバーポスト併用のレジンコア（FP）とした．歯根象牙質との接着界面には，垂直方向の引張応力 20 MPa 以上あるいは水平方向の剪断応力 35 MPa 以上で剥離するように設定した．接着界面の剥離は F では舌側歯頸部に限局したが，NF ではポスト周囲へと拡大した．Von Mises 応力集中は，F では歯根中央と根尖の境界付近にみられるが，NF では歯頸部唇側と歯頸部ポスト孔隣接面側にみられた．また応力値では歯根中央から根尖側では F と NF で差がなかったが，歯頸部付近では NF が F よりも大きく，また NF では FP が MP より大きかった．以上の結果から，ポストの種類は歯頸部の応力に影響を及ぼすが，フェルールが存在することにより歯頸部の応力やポストの種類による影響を軽減し，その結果歯根の破折強度や破折様相にも差を生じるものと考えられた．

索引用語：三次元有限要素法，フェルール，応力分布，支台築造，ファイバーポスト

Abstract: Stress distributions in a non-vital abutment tooth was analyzed using with three dimensional finite element method. Two type of abutment model were constructed namely ferrule model (F) and without ferrule model (NF), and simulated metal post (MP) and fiber-post (FP) for each model. In this analysis, the interface adhesive failure was set if 20 MPa or more tensile stress and/or 35 MPa or more shear-bond stress was loaded. With loadings, adhesive failure started at the lingual margin of the artificial crown and limited within the margin for F, whereas expanded around the post to its apex for NF. In F, stress concentrated around the middle third and the apical third of root, while in NF, von Mises stress concentrated around the outer side of the labial cervix and around the inner side of the proximal cervix. Maximum principal stress concentrated in the lingual surface of the root and in the inner side of the proximal cervix. In the middle and apical area of the root, the difference of stress intensities were not clear between in F and in NF nor among various types of post. In the cervical area, the

stress of NF was more intensive than that of F, and the stress of NF was more intensive in the root restored with FP than that with MP.

Following the results above, it was suggested that the materials of posts affected the stress distribution, but the existing ferrule made less stress around the cervical area to lead the less influence of post types, which effected the fracture strength and fracture mode in various fashion. (250/300 words)

Key words: three dimensional finite element method, Ferrule, stress distributions, post-and-core, fiber-post

## 緒 言

支台築造とは、崩壊した歯冠部分を人工的材料によって上部構造を装着することのできる支台歯形態に回復する操作をいう<sup>1)</sup>。支台築造のポスト部分は、支台築造体の保持力を得ることの他に、残存歯質を補強する効果があるといわれていた<sup>2,3)</sup>、そのため、失活歯では支台築造を行うことが推奨されてきた。しかし、支台築造歯の予後に関しては、支台築造体ごとの脱離、あるいは歯根破折を生じる可能性が報告されている<sup>4~6)</sup>。

近年では歯冠部歯質を保存し、クラウンで被覆するフェルールが支台築造体の脱離や歯根破折の防止にとって有効とされている<sup>1,7-20)</sup>。一方、ポストによる歯根の補強効果について、Guzy ら<sup>21)</sup>、Assif ら<sup>22)</sup> は、支台築造歯の歯根に生じる応力は歯根外側で大きく、内側では小さいことから、ポストによる歯根破折抵抗への効果を否定している。また Ko ら<sup>23)</sup> は、有限要素法による解析から、ポストによる歯根内の応力軽減効果は少ないと述べている。さらに、ポストには歯根を補強する効果はなく、剛性の高いポストの使用は、歯根内に応力集中を生じることによって、歯根破折を惹起する可能性が高まるといわれるようになった<sup>1,24)</sup>。

ポストの材質については、ポスト尖端の応力集中を防止するためにカーボンファイバーをレジンで束ねたファイバーポストが開発され、さらにグラスファイバーを応用したファイバーポストが開発されている<sup>1,25-27)</sup>。ファイバーポストは、その弾性が象牙質に近いことから、歯根象牙質内に応力集中を生じず、金属ポストよりも歯根破折を引き起こしにくいといわれていた<sup>11,25,28-30)</sup>。しかし、近年では抜去歯による破折

試験からファイバーポストによる支台築造歯は金属による支台築造歯よりも破折強度が小さいという報告<sup>16,31)</sup>がなされるようになった。また、歯根破折を歯頸部付近で生じるため、抜歯を免れることが利点として挙げられるようになった<sup>14-17)</sup>。そして、カーボンファイバーが黒色なのに対してファイバーポストは白色であり、歯質と色調の近い<sup>25,26)</sup>ことから、臨床において多く使用されるようになってきたが、支台築造歯の破折強度、応力分布、臨床経過など、明らかではない点が多い<sup>25)</sup>。

そこで、レジンコアによる支台築造歯について、支台築造体のポスト材料が支台築造歯の歯根破折に及ぼす影響を検討するため、フェルールの有無を加味し、レジンコアと歯根象牙質との界面に剥離を生じるモデルを構築し、三次元有限要素法による応力解析を行い、荷重時の応力分布について検討した。

## 方 法

### 1. 解析モデルの構築

上顎中切歯に支台築造を行った後に陶材焼付冠およびその支持組織とする解析モデルを構築した (Fig 1)。解析モデルの構成要素を Fig 2 に、また過去の報告<sup>31,32)</sup>に基づき、各構成要素の物性値を Table1 に示す。支台歯形態として、根管充填ののちに解剖学的歯頸線から 2 mm 上方で歯冠部歯質を水平に切断したものと、歯冠部歯質のないものの 2 種類とした。いずれの支台形態にもポスト孔の形態として長径を歯根長の 2/3、幅径を解剖学的歯頸線の高さで歯根幅径 1/3 に設定し、ポストコアによる支台築造後、陶材焼付冠を装着した上顎中切歯と歯周組織を含め、鏡面对称形とし

て半側の三次元有限要素法モデルを構築した．なお，解析モデルの要素は，等方性の 8 節点 6 面体とした．

## 2. 解析条件

歯冠部歯質が残存し，陶材焼付冠で被覆されたフェルールありの支台歯形態モデル (Ferrule, 以下 F) と歯冠部歯質が残存せず，歯質が被覆されていないフェルールなしの支台歯形態モデル (non-Ferrule, 以下 NF) を設定した．F における歯冠部歯質の高さは，先人達の報告<sup>1, 7, 10-13)</sup>に準じて 2mm とし，歯頸部辺縁形態はショルダータイプとした．支台築造体には，ボンディング処理をしたコンポジットレジン（以下コンポジットレジン）のみ，コンポジットレジンに既製金属ポストを併用，あるいはグラスファイバーポストを併用したものを設定した．

拘束条件としては，支持組織の基底面と近遠心面を XYZ 方向に，また鏡面对称面を X 方向とした．荷重は，切縁中央に舌側 45° から 50～200N 静荷重を設定した．

歯根象牙質とコンポジットレジンとの接着界面における界面破壊による剥離および剥離時の歯根象牙質内の応力分布を解析するために，接着界面を介して両構成材料で同一座標を有する一対の節点間を伝達する応力を求め，界面に垂直な引張応力 20MPa 以上<sup>33, 34)</sup>，また，剪断接着強さが引張接着強さより強いことから<sup>35)</sup>，界面に垂直な圧縮応力が生じていない状態で界面に平行な剪断応力が 35MPa 以上生じた場合に界面破壊，すなわち剥離を生じるものとした．

剥離を生じた節点間では以降のステップにおいて界面に垂直な圧縮応力のみを伝達するものとした (Fig 3)．

目的とする荷重量までを 20 段階に分け，弱い荷重から徐々に荷重量を増大させ，計算を繰り返した．各荷重量においても，界面の状態が変化しなくなるまで応力計算を繰り返したのち，次の荷重量へと漸増させ，応力計算を行った．

界面における剥離範囲の図示化条件を Fig 4 に示す．支台築造体表層の要素のうち，歯根象牙質との界面を構成する面に含まれる 4 節点すべてが剥離した状態を剥離範囲とした．

## 結 果

### 1. 荷重下における界面の離開と剥離範囲の変化

荷重量 200N において，F ではクラウン舌側辺縁部のショルダ一部に限局して，わずかな離開がみられたが，NF では舌側クラウン辺縁部からポスト周囲へと広がる離開が観察された (Fig 5)．Fig 6 に，各荷重量におけるファイバーポスト併用時の界面剥離の範囲を赤色で示す．F では，剥離が舌側歯頸部から生じるが，荷重が増大しても舌側歯頸部に限局していた．それに対して，NF では荷重の増大に伴い舌側辺縁部から剥離が始まり，根面からポスト周囲，さらにポスト尖端へと拡大した．

### 2. ポスト材料の違いによる剥離範囲の差

界面剥離の状態は，F において，いずれのポスト材料でも舌側ショルダ一部に限局していた．一方，NF ではグラスファイバー併用と既製金属ポスト併用においてポスト尖端周囲まで剥離が拡大し，コンポジットレジン単独の場合よりも広い範囲で剥離が観察された (Fig 7)．



### 3. 歯根象牙質内の von Mises 応力分布

F では舌側根尖 1/3 で最大値を示すものの、応力分布はほぼ唇舌的に対称な分布を示した。一方、NF ではファイバーポスト併用時と既製金属ポスト併用時では同様の傾向を示し、唇側歯頸部に応力集中が最も顕著であり、ついで舌側根尖 1/3 付近、さらに隣接面歯頸部のポスト孔側に応力集中が認められた (Fig 8)。

### 4. 歯根象牙質内の von Mises 応力値

歯根象牙質内の von Mises 応力は、F では荷重量 200 N までの範囲において、歯根舌側壁の外側で最も大きく、その大きさもほぼ等しかった (Fig 9)。これに対して、NF ではいずれも歯頸部唇側面が最大であるものの、コンポジットレジン単独あるいはファイバーポスト併用が既製金属ポスト併用よりも大きな値を示した。

荷重量 200 N 時における応力値を比較すると、歯根中央部から根尖方向の舌側面ではポストのいずれの種類においても、F と NF で von Mises 応力の応力値に差はみられなかった (Fig 10)。これに対して、歯頸部での応力値は、隣接面、唇側面ともに、NF は F よりも大きかった。歯頸部舌側面は逆に、F が NF よりも大きかった。

## 考 察

### 1. 解析方法について

支台築造法の検討に用いられる手法として、抜去歯を用いた破折試験<sup>7-9, 12-18, 20)</sup>、光弾性試験による応力解析<sup>36, 37)</sup>、有限要素法による応力解析<sup>23, 24, 30, 31, 32)</sup>が挙げられる。抜去歯による破折試験は歯根の破折強度や破折様相を知るうえで有効な手法<sup>38-</sup>

41)であるが、適切な形態や大きさの歯を用いることが困難であるうえに、近年では抜去歯自体の入手が困難となりつつある。このため、人工歯を使用したひずみ測定<sup>19)</sup>や有限要素法による応力解析から支台築造法の影響を検討したものが報告されるようになった。しかし、有限要素法では、その解析の簡便性や使用するコンピュータの性能から、等方性材料に対する線形解析とされることが多かった。Peters ら<sup>38)</sup>は、支台築造体と歯根象牙質との界面を完全接着、すなわち固着状態としてモデルと界面に摩擦接触を想定したモデルについて有限要素法解析を行い、歯根内の応力分布に差を生じることを報告している。これらのことから、有限要素法解析では各構成材料間の界面は固着状態とされていたのに対して、光弾性試験では歯科用セメントによって合着された界面では荷重によって界面の剥離を生じるために、異なる結果を生じる可能性が考えられる。歯根に人工物で支台築造を行い、さらに歯冠補綴装置を装着した支台築造歯は数種類の材料からなる複合体であり、荷重下では最も弱い部位に破壊を生じ、応力分布に変化を生じると、それまで応力集中の見られなかった部位に新たな応力集中を生じる可能性が考えられる。抜去歯による破折試験で破折線が多く報告されている隣接面における応力集中が報告されることは少なかった。Okamoto ら<sup>32)</sup>は、支台築造体を合着する歯科用セメント内に凝集破壊を生じるものとして歯根内の応力分布について、三次元有限要素法による応力解析を行った場合には、歯根象牙質内の応力分布は歯科用セメントによる装着が固着状態と異なり、唇舌的に対称ではないこと、さらに歯根隣接面の歯頸部に応力集中が見られることを報告している。近年、支台築造体の装着に関しては接着性レジンセメントを用いることが多い。Mendoza ら<sup>42)</sup>

は、リン酸亜鉛セメントと接着性レジンセメントで支台築造体を装着した歯根について破折試験を行い、接着性レジンセメントで装着した支台築造歯の方が破折強度の大きいことを報告している。Libman ら<sup>9)</sup>は、装着材料としてリン酸亜鉛セメントを用いた支台築造歯に繰り返し荷重を加えると、荷重側である舌側歯頸部のクラウン辺縁に剥離を生じることを報告している。接着性レジンセメントやコンポジットレジン、象牙質と接着性があることから、リン酸亜鉛セメントによる合着とは異なると考えられる。しかし、コンポジットレジンとエナメル質との接着は、唾液などの水分によって接着力が減弱すること、また象牙質を対象とした場合には、エナメル質を対象とした場合よりも接着力が弱い。これらのことから、コンポジットレジンと歯根象牙質との界面で剥離を生じる可能性が高いものとして、まずコンポジットレジンと歯根象牙質との接着界面で剥離を生じるものとして解析を行った。界面条件を固着とした場合には、フェルールのある F とない NF で歯根象牙質内の応力分布に差がなく、抜去歯による破折試験<sup>7-9, 12-18, 20)</sup>における破折様相異なる結果となった (Fig 11)。これに対して、剥離を想定した場合には、Fig 8 で示すように、F での応力分布の差は少なかったが、NF における応力集中が歯頸部に生じ、歯頸部ポスト孔隣接面側にみられた。抜去歯による破折試験では、フェルールがある場合には歯根中央付近で水平方向の歯根破折を生じ、フェルールがない場合には歯頸部から縦あるいは斜め方向の歯根破折を生じることが報告されている<sup>7, 12, 14, 16, 43)</sup>。歯根象牙質内の応力集中部位が歯根破折の開始部位であるとする、界面に剥離を想定することによって、破折試験に近似した解析結果を得ることができると考えられる。

## 2. 接着界面の剥離範囲について

歯根象牙質と陶材焼付冠および支台築造体との接着界面の剥離は、フェルールのあるモデル F では、Fig 6 で示すように舌側歯頸部の陶材焼付冠と歯根象牙質とのショルダー部に限局していた。これに対して、フェールのない NF では陶材焼付冠および、さらにポスト周囲、ポスト尖端付近まで剥離が拡大していた。フェールのない支台歯形態の欠点として、脱離しやすいことが挙げられているが<sup>9, 10)</sup>、この界面の剥離はポスト部からの脱離を惹起させる可能性が考えられる。

各支台築造材料における界面剥離範囲は、モデル NF ではファイバーポスト併用および金属既製ポスト併用のレジンコアでは差がみられなかったが、コンポジットレジン単独の場合ではより限局的な分布を示した。F では支台築造材料による界面剥離範囲の差はみられなかったが、NF では支台築造体の材料によって差を生じると考えられる。今回の解析モデルで設定したフェールの高さは 2 mm であり、この程度の残存歯質が保存されている場合には、支台築造材料の違いによる脱離への影響は少ないと考えられる。

## 3. 応力集中部位について

先人たちによる歯根象牙質内の応力分布の報告<sup>23, 30-32, 40, 41)</sup>では、指標として von Mises 応力を用いたものが最も多く、ついで最大主応力<sup>24, 31)</sup>が多かった。これらのことから、本研究では von Mises 応力を歯根破折を引き起こす指標として用いた。von Mises 応力集中は、唇側および舌側の歯根外表面および隣接面のポスト孔側にみられた。そして応力集中は隣接面の外表面に認められなかったことから、隣接面のポスト

孔側，すなわち対称面側からの観察によって，歯根象牙質内に生じる応力集中は観察できると考えられるため，応力分布の表示は，対称面側のみとした．

界面を固着した状態で解析すると，モデル F とモデル NF のいずれにおいても，von Mises 応力の応力分布は唇舌的に対称であり，歯根中央部と根尖 1 / 3 との境界付近の歯根外側に応力の集中がみられた．しかし，界面に剥離を生じるものとして解析した場合には，フェルールがある場合には荷重量が大きくなっても応力集中の部位は界面固着状態の時と変化がなかった．それに対して，フェルールがない場合には荷重量 50 N では，舌側の歯根中央 1 / 3 と根尖 1 / 3 との境界付近の外側に応力集中が出現するとともに，唇側歯頸部の外側にも応力集中を生じるようになった．そして，荷重量が 150 N，さらに 200 N と大きくなるにつれて舌側歯根外側よりも唇側歯頸部の応力集中が著しくなるとともに，歯頸部のポスト孔隣接面側に応力集中が出現するようになった．この応力分布は既製金属ポスト併用のレジンコア，ファイバーポスト併用のレジンコアのいずれにおいても同様の傾向がみられた．野露ら<sup>19)</sup>は，歯根形状の模型にひずみゲージを貼付することによって，ポストへの側方荷重下で歯根に生じるひずみを測定し，フェルールのない支台歯形態では根面のポスト孔側のひずみが大きくなることを報告している．この報告ではひずみを測定していることから，今回の有限要素法解析とはひずみと応力との差があるものの，模型を用いた試験と同様の結果が得られた．このことから，模型とモデルいずれにおいても応力集中は一致したと考えられる．

フェルールがある場合，von Mises 応力は，歯根中央部と根尖 1 / 3 との境界付近に

において頬舌側壁の外側に、また最大主応力は同様の部位の舌側壁外側に応力集中がみられ、いずれの応力を破壊基準としても、歯根中央部と根尖 1 / 3 との境界付近から破折を生じると考えられる。またフェルールのない場合には、von Mises 応力が唇側歯頸部あるいは歯頸部隣接面に、最大主応力は歯頸部隣接面に応力集中がみられ、歯頸部から破折を生じることが考えられた。抜去歯を用いた破折試験では、フェールがある場合には歯根中央あるいはポスト尖端付近において水平方向の破折線を生じることが報告されている<sup>7, 19, 34, 43)</sup>。土屋<sup>39)</sup>は、抜去歯に支台築造を行い、荷重下で生じた破折線を連続的に観察し、フェールのない支台築造歯ではポストの近遠心から始まると報告している。また野露ら<sup>19)</sup>は、フェールのある場合には歯根中央付近で水平方向の破折を生じた試料では、破折線はポスト尖端よりも歯頸側にみられ、ポスト尖端を含むものはみられなかったと報告している。さらにまた舌側の歯根中央でのひずみが最も大きく、水平破折は舌側の歯根中央の表層における応力が原因であることも考察している。これらのことから、今回の解析における応力集中部位は、歯根破折の開始部位となる可能性が考えられた。

#### 4. 既製金属ポスト併用とファイバーポスト併用における応力分布と歯根破折部位について

歯根象牙質内の von Mises 応力は、F では、荷重量 200 N までの範囲において、歯根舌側壁の外側で最も大きく、いずれのポスト材料においてもその大きさはほぼ等しかった。これに対して、NF ではいずれも歯頸部唇側面が最大であるものの、コンポジ

ットレジン単独あるいはファイバーポスト併用が既製金属ポスト併用よりも大きな値を示した。

荷重量 200 N 時における応力値を比較すると，歯根舌側中央部ではポストのいずれの種類においても，フェルールのある場合とない場合で応力値に差はみられなかった．それに対して，歯頸部での von Mises 応力値は，フェルールのない場合はフェルールのある場合よりも大きかった．歯頸部舌側面は逆に，フェルールのある場合がない場合よりも大きかった．野露ら<sup>19)</sup>は，荷重下で歯根表面に生じるひずみについて，唇側歯頸部のひずみに対する舌側歯頸部のひずみが大きいことを報告している．Libman ら<sup>9)</sup>は繰り返し荷重下で，フェルールがない場合に，舌側歯頸部に剥離を生じること報告している．これらのことから，支台築造歯にクラウンを装着した場合は，舌側から加えた荷重下において，舌側に剥離を生じており，今回の解析においてもフェルールのない場合に von Mises 応力値は舌側歯頸部で小さく，唇側歯頸部で大きくなったものと考えられる．フェルールのない場合，歯頸部隣接面の応力は，コンポジットレジン単独が最も大きく，既製金属ポストが最も小さい値を示した．フェルールを設定した支台歯はフェルールがない場合よりも破折強度が大きいことが報告されている<sup>7-16)</sup>．象牙質の破壊強度は部位や象牙細管の方向によって異なることが報告されている<sup>44)</sup>．そのため，単純に大きな応力の発生部位から歯根破折を生じるとはいえない．しかし，同一部位の応力値について，種々の条件下で応力値を比較した場合には，大きな応力を生じる条件のほうが歯根破折を生じやすいと考えられる．歯根舌側壁の外側に生じる応力値は，フェルールの有無やポスト材料によっても差がみられ

ないことから、歯根中央部における歯根破折の強度に影響を及ぼさないと考えられる。これに対して、歯頸部付近の応力は、フェルールがないと大きくなり、歯根舌側壁に生じる応力よりも大きくなった。したがって、フェルールがないと、フェルールがある場合よりも歯頸部から歯根破折を生じる可能性が大きくなることが考えられる。また、フェルールがない場合の歯頸部における応力は、コンポジットレジン単独が最も大きく、ついでファイバーポスト併用、既製金属ポスト併用の順であった。今回の解析におけるポストの種類における応力値の差は小さかったが、Qing ら<sup>15)</sup>、Asmussen ら<sup>31)</sup>はポストの弾性係数が小さい方が、歯頸部における応力が大きくなりやすいと述べており、同様の傾向を示していると考えられる。抜去歯を用いた破折試験においても、ファイバーポスト併用レジンコアによる支台築造歯は金属ポストあるいは金属鑄造体を用いた支台歯よりも歯頸部を含む破折線を生じやすいと報告されている<sup>18, 24)</sup>。応力が歯根象牙質の破壊強度を超えた場合に破折を生じることから、歯頸部付近で大きな応力値を示す NF で歯頸部から破折を生じ易いと考えられる。このことは、ファイバーポスト併用による支台築造歯にもあてはまると思われる。

以上のことから、フェルールを設定したときには、既製金属ポストとファイバーポストなど、ポスト材料によって歯根の破折強度や破折様相に差を生じないが、フェルールを設定できない場合には、歯頸部からの歯根破折を生じやすいこと、特に既製金属ポスト併用時よりもファイバーポスト併用時にこの傾向が強まることが考えられた。



## 結 論

支台築造体のポスト材料が支台築造歯の歯根破折に及ぼす影響を検討するため、フェルールの有無を加味し、レジンコアと歯根象牙質との界面に剥離を生じるモデルを構築し、三次元有限要素法を用いて解析を行った結果、以下の結論を得た。

1. レジンコアと歯根象牙質との界面剥離範囲は、フェールがない場合は広範囲に及び、フェールがある場合は舌側歯頸部に限局していた。
2. 荷重量の増加に伴う歯根象牙質内の応力集中部位は、フェールがある場合は変化しないが、フェールがない場合は、歯根中央、さらに根尖寄りの部分から歯頸側付近に変化した。
3. 歯根象牙質内に生じる von Mises 応力は、歯頸部隣接面と歯頸部唇側面でフェールがない場合がある場合よりも大きかった。そして歯頸部舌側面ではフェールがある場合の方が大きかった。
4. 歯頸部の隣接面における歯根象牙質内の応力値はレジンのみの場合が最も大きく、次いでファイバーポスト併用、既製金属ポスト併用の順であった。

## 謝 辞

稿を終えるにあたり、終始ご懇篤なご指導いただきました機能保存回復学講座  
歯科補綴学分野 藤澤政紀教授に厚く御礼申し上げます。また、論文の審査に  
あたり、ご指導、御校閲を賜りました機能保存回復学講座歯科生体材料学分野  
中畠 裕教授、機能保存回復学講座歯科補綴学分野 大川周治教授、機能保存  
回復学講座保存治療学分野 横瀬敏志教授に深く感謝申し上げます。

さらに本研究にあたり、ご協力いただきました猪野照夫准教授をはじめ機能  
保存回復学講座歯科補綴学分野の諸先生に厚く感謝致します。

## 引用文献

- 1) 中村善治, 小川 匠 : 第2章 臨床操作 IV支台築造. In  
: クラウンブリッジ補綴学. 矢谷博文, 三浦宏之, 細川隆  
司, 小川 匠編, 第5版, 医歯薬出版, 東京, pp124-132,  
2014
- 2) Baraban DJ; The restoration of pulpless teeth. Dent  
Clin North Am Nov, 633-635, 1972
- 3) Kantor M and Pines MS: A comparative study of  
restorative techniques in pulpless teeth. J Prosthet  
Dent 34, 405-412, 1977
- 4) Sorensen JA and Martinofdf JT: Intracoronal  
reinforcement and coronal coverage: A study of  
endodontically treated teeth. J Prosthet Dent 51, 780-  
784, 1984
- 5) Morgano SM and Milot P: Clinical success of cast metal  
posts and cores. J Prosthet Dent 70, 11-16, 1993.
- 6) 福島俊士, 坪田有史 : 支台築造の予後成績. 日補綴歯会誌  
45, 660-668, 2001
- 7) Barkhordar RA, Radke R and Abassi J: Effect of metal  
collars on resistance of endodontically treated teeth  
to root fracture. J Prosthetic Dent 61, 676-678, 1989

- 8) Sorensen JA and Engelman MJ: Ferrule design and fracture resistance of endodontically treated teeth. J Prosthet Dent 63, 529-536, 1990
- 9) Libman WJ and Nicholls JI: Load fatigue of teeth restored with cast posts and cores and complete crowns. Int J Prosthodont 8, 155-160, 1995
- 10) Stankiewicz NR and Wilson PR: The ferrule effect: a literature review. Int Endod J 35, 575-581, 2002
- 11) 福島俊士: 適切な支台築造法を求めて. 日補綴歯会誌 47, 261-271, 2003
- 12) Zhi-Yue L and Yu-Xing A: Effect of post-core design and ferrule on fracture resistance of endodontically treated maxillary central incisors. J Prosthet Dent 89, 368-373, 2003
- 13) Tan PLB, Aquillino SA Gratton DG, Stanford CM, Tan SC and Johnson WT: In vitro fracture resistance of endodontically treated central incisors with varying ferrule heights and configurations. J Prosthet Dent 93, 331-336, 2005
- 14) 大柁貴俊: ファイバーポスト併用レジン支台築造のポスト長に関する研究. 日補綴歯会誌 50, 180-190, 2006
- 15) Qing H, Zhu Z, Chao Y and Zhang W: In vitro

- evaluation of the fracture resistance of anterior endodontically treated teeth restored with glass fiber and zircon posts. J Prosthet Dent 97, 93-98, 2007
- 16) Hu S, Osada T, Shimizu T, Warita K and Kawawa T: Resistance to Cyclis fatigue and fracture of structurally compromised root restored with different post and restorations. Dent Mater J 24, 225-231, 2005
- 17) Varvara G, Perinetti G, Dilorio D, Murmura G and Caputi S: In vitro evaluation of fracture resistance and failure mode of internally restored endodontically treated maxillary incisors with differing heights of residual dentin. J Prosthet Dent 98, 366-372, 2007
- 18) Ma PS, Nichollls JI, Junge T and Phillips KM: Load fatigue of teeth with different ferrule lengths, restored with fiber posts, complete resin cores, and all-ceramic crown. J Prosthet Dent 102, 229-234, 2009
- 19) 野露浩正, 猪野照夫, 岡本和彦, 岩瀬直樹, 佐藤雅介, 飯塚知明, 熊瀬名保子, 藤澤政紀: 荷重下における歯根表面の多点ひずみ解析. 明海歯学 40, 162-172, 2011
- 20) Amin WM, Al-Huniti NS, Amin U, Abu-Awad AA, Amin

- SW and Abousy YA: Influence of root posts and retained coronal dentin on fracture resistance and failure pattern of endodontically treated maxillary incisors. J Curr Surg 3, 73-81, 2013
- 21) Guzy GE and Nicholls JI: In vitro comparison of intact endodontically treated teeth with and without endo-post reinforcement. J Prosthet Dent 42, 39-44, 1979
- 22) Assif D and Gorfil C: Biomechanical considerations in restoring endodontically treated tooth. J Prosthet Dent 71, 565-567, 1994
- 23) Ko C-C, Chu C-S, Chung K-H and Lee M-C: Effect of posts on dentin stress distribution in pulpless teeth . J Prosthet Dent 68, 421-427, 1992
- 24) 北村 茂, 積田光由, 坪田有史, 小久保祐司, 福島俊士, 二次元有限要素法解析による支台築造の力学的検討. 鶴見歯誌 33, 21-29, 2007
- 25) 石上恵一, 倉澤郁文, 山口泰彦: ファイバーポスト併用レジン築造の問題点と可能性. 日補綴歯会誌 50, 145-165, 2006
- 26) Lassila LVJ, Bell AL, Narva K and Vallittu PK: Flexural properties of fiber reinforced root canal

- posts. Dent Mater 20, 29-36, 2004
- 27) Fernandes AS, Shetty S and Coutinho I: Factors determining posts selection: A literature review. J Prosthet Dent 90, 556-562, 2003
- 28) Cagidiaco MC and Goracci C: Clinical Studies of fiber posts: A literature review. Int J Prosthodont 21, 328-336, 2008
- 29) Goto Y, Nicholls JI, Phillips KM and Junge T: Fatigue resistance of endodontically treated teeth restored with three dowel-and-core systems. J Prosthet Dent 93, 45-50, 2005
- 30) Okada D, Miura H, Suzuki C, Komada W, Shin C, Yamamoto M and Masuoka D: Stress distribution in roots restored with different types of post systems with composite resin. Dent Mater J 27, 605-611, 2008
- 31) Asmussen E, Peutzfeldt A and Sahafi A: Finite element analysis of stresses in endodontically treated, dowel-restored teeth. J Prosthet Dent 94, 321-329, 2005
- 32) Okamoto K, Ino T, Iwase N, Shimizu E, Suzuki M, Satoh G, Ohkawa S and Fujisawa M: Three-dimensional finite analysis of stress distribution in composite

- resin cores with fiber posts of varying diameters.  
Dent Mater J 27, 49-55, 2008
- 33) 若狭邦男：新世代「接着理論」の展開　－接着界面－. 広  
大歯誌 37, 121-128, 2005
- 34) Okuma M, Nakajima M, Hosaka K, Itoh S, Ikeda M,  
Foxton RM and Tagami J: Effect of composite post  
placement on bonding to root canal dentin using 1-  
step self-etch dual-cure adhesive with chemical  
activation mode. Dent Mater J 29, 642-648, 2010
- 35) 北迫勇一, 山田敏元, 二階堂 徹, 原田直子, マイケル  
F バロー, 猪越重久, 高津寿夫, 増原英一. 歯材機 14,  
117-130, 1995
- 36) Hunter AJ, Feiglin B and Williams JF: Effects of  
post placement on endodontically treated teeth. J  
Prosthet Dent 62, 166-172, 1986
- 37) 武井秀典：さまざまなレジンコアとクラウンによる修復  
支台歯の歯根象牙質に加わる応力の光弾性解析. 口病誌  
77, 71-80, 2010
- 38) Peters MCRB, Poort HW, Farah JW and Craig RG:  
Stress analysis of tooth restored with a post and core.  
J Dent Res 62, 760-763, 1983
- 39) 土屋総一郎：ポスト装着歯に生じた亀裂に関する研究.

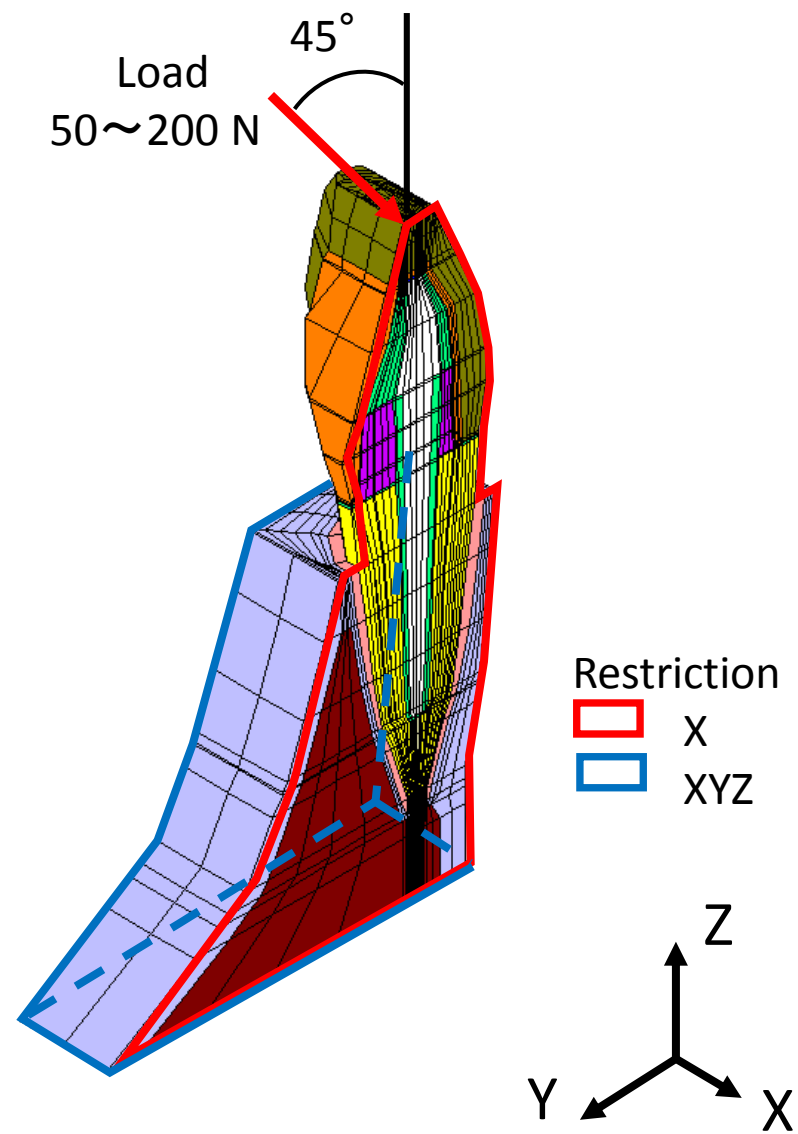
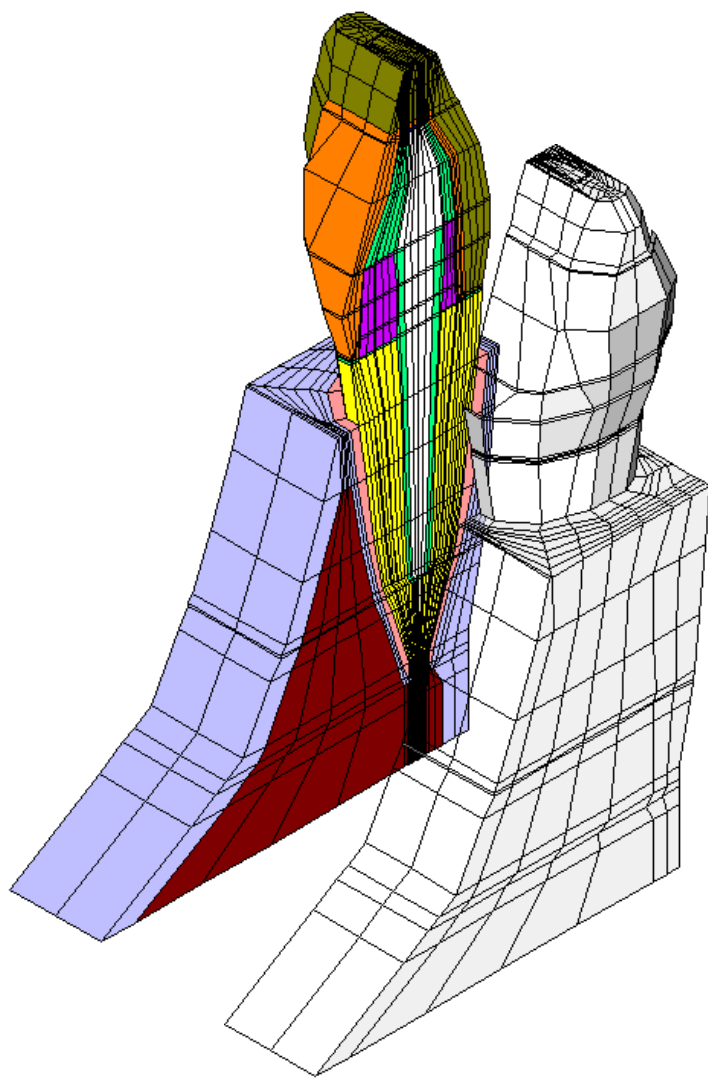











日補綴歯会誌 47, 671-679, 2003

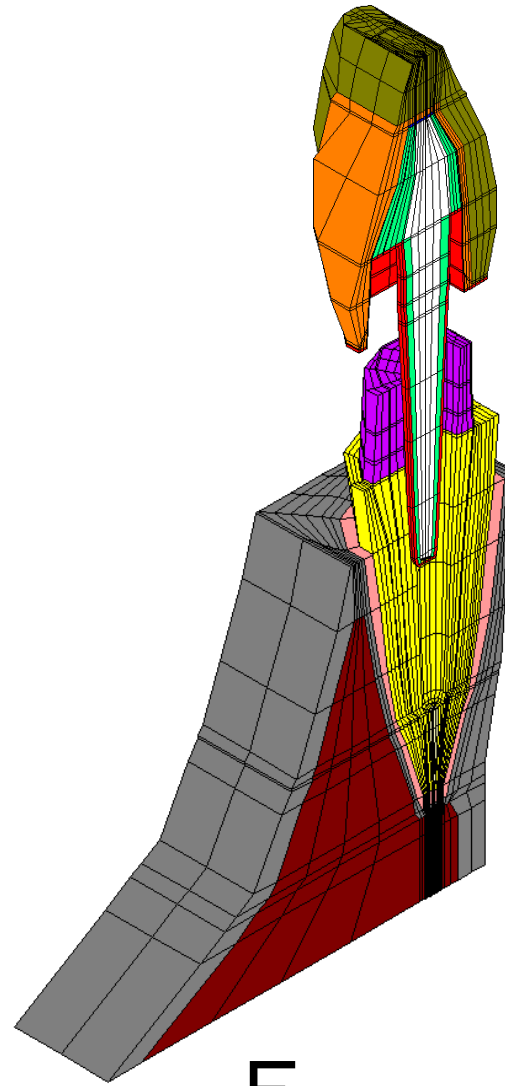
- 40) 岡本和彦, 猪野照夫, 天野秀雄, 荒井 学, 鈴木めぐみ,  
曾根峰世: 歯冠部歯質の有無と合着用セメント層が支台築  
造歯の象牙質内応力分布に及ぼす影響. 日補綴歯会誌 48,  
602-611, 2004
- 41) Toksavul S, Zor M, Toman M, Güngör MA, Nergiz I  
and Artunç C: Analysis of dentinal stress  
distribution of maxillary central incisors subjected  
to various subjected to various post-and-core  
appliications. Oper Dent 31, 89-96, 2006
- 42) Mendoza DB, Eakle WS Kahl EA and Ho R: Root  
reinforcement with a resin-bonded preformed post. J  
Prosthet Dent 78. 10-14, 1997
- 43) Carlini-Junior B, Cecchin D, Farina A, Fereira GS,  
Prieto LT and Paulillo LA: Influence of remaining  
coronal structure and of the marginal design on the  
fracture strength of roots restored with cast posts  
and core. Acta Odont Scand 71, 278-282, 2013
- 44) Karina A, Pereira PNR and Thompson JY: Influence  
of load cycling and tubule orientation on ultimate  
tensile strength of dentin. J Adhes Dent 6, 191-194,  
2004



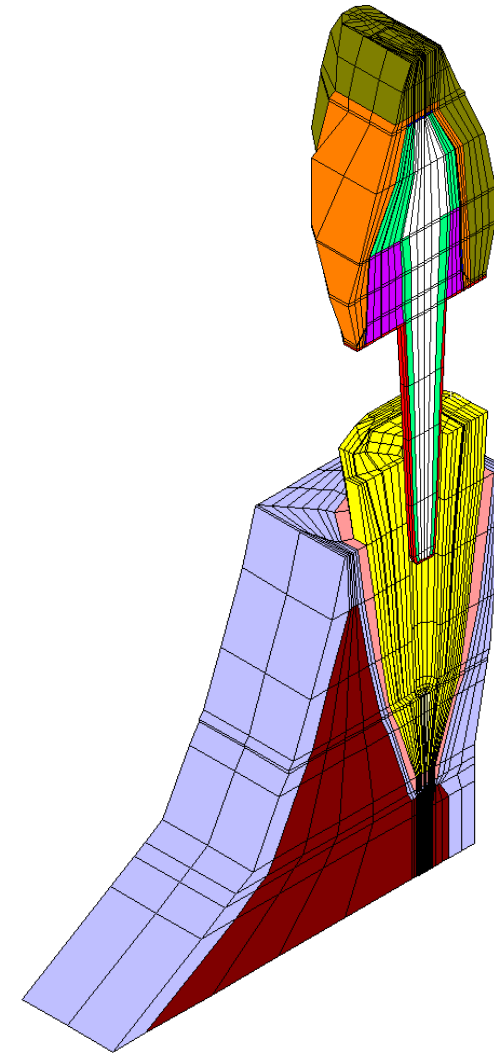
Fig 1  
佐藤



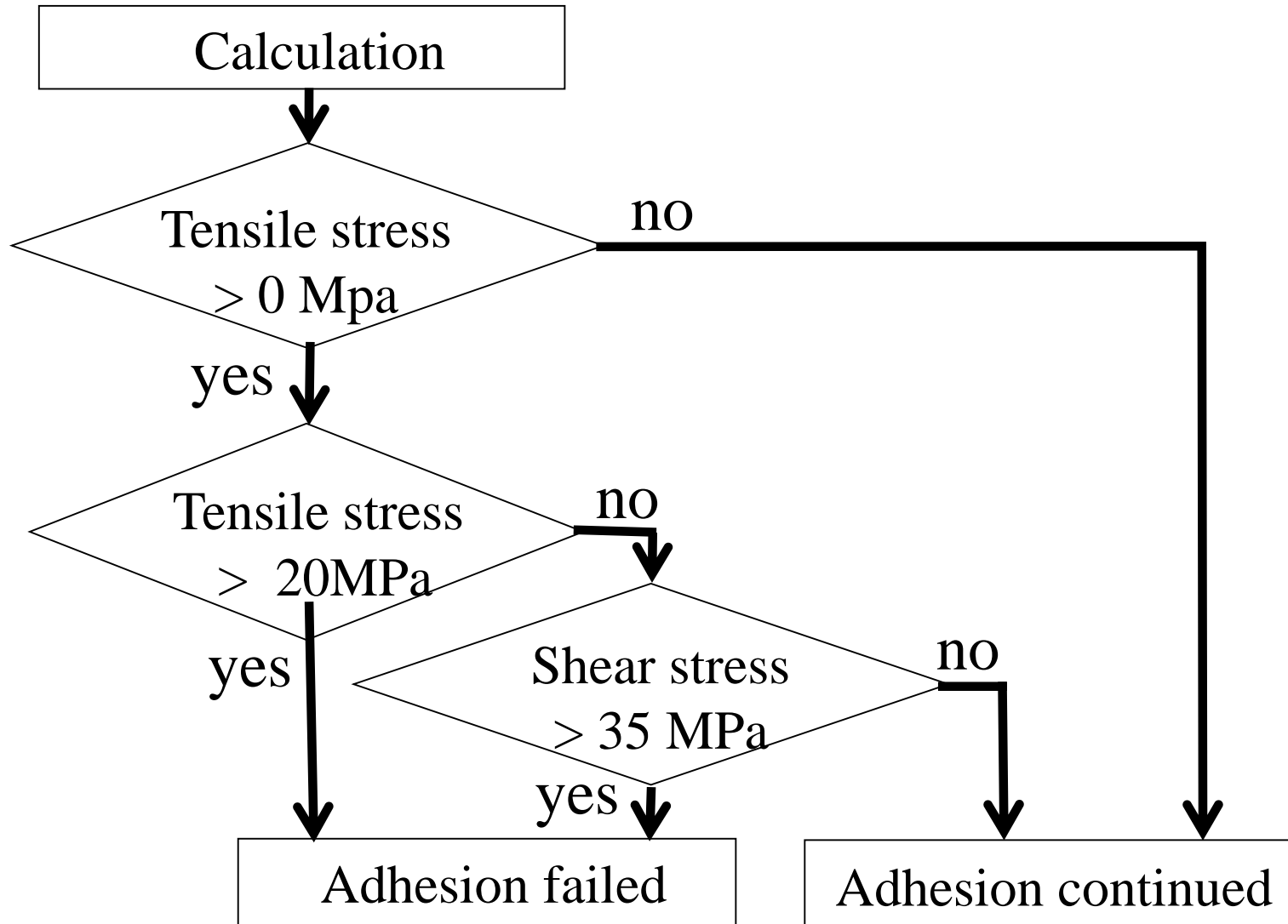
-  Fiber post or Stainless steel
-  Dentin
-  Dentin or Composite resin
-  Gold alloy
-  Porcelain
-  Guttapercha
-  Periodontium
-  Cortical bone
-  Sponge bone
-  Composite resin
-  Composite resin  
In the interface

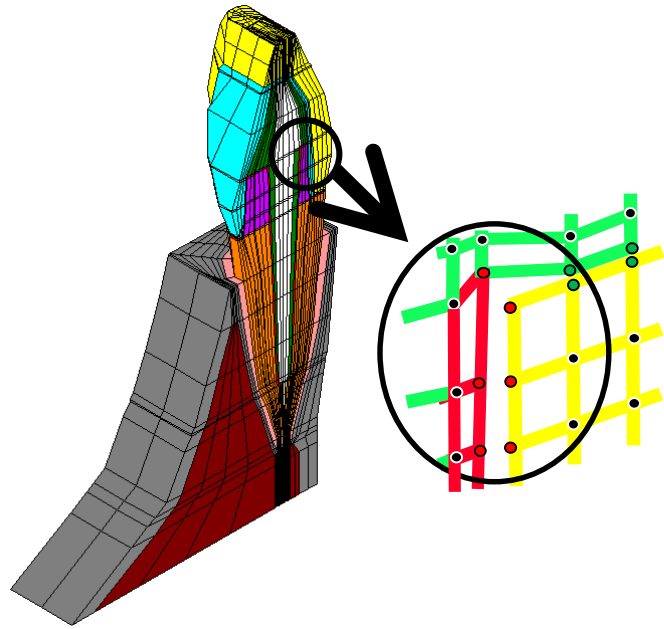


F  
With ferrule

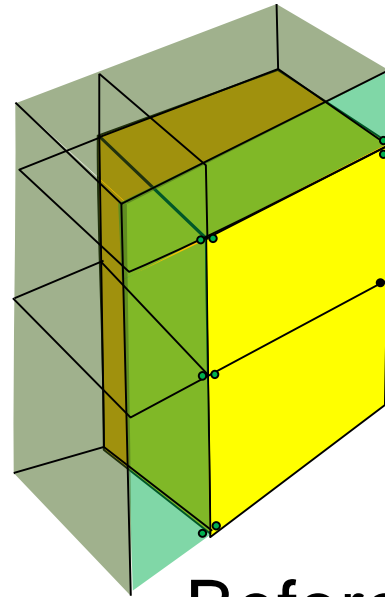


NF  
Without ferrule

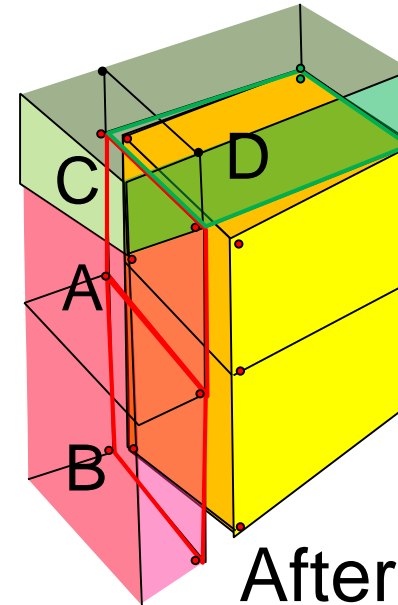




Nodes in the interface  
● Adhesion continuing  
● Adhesion failed

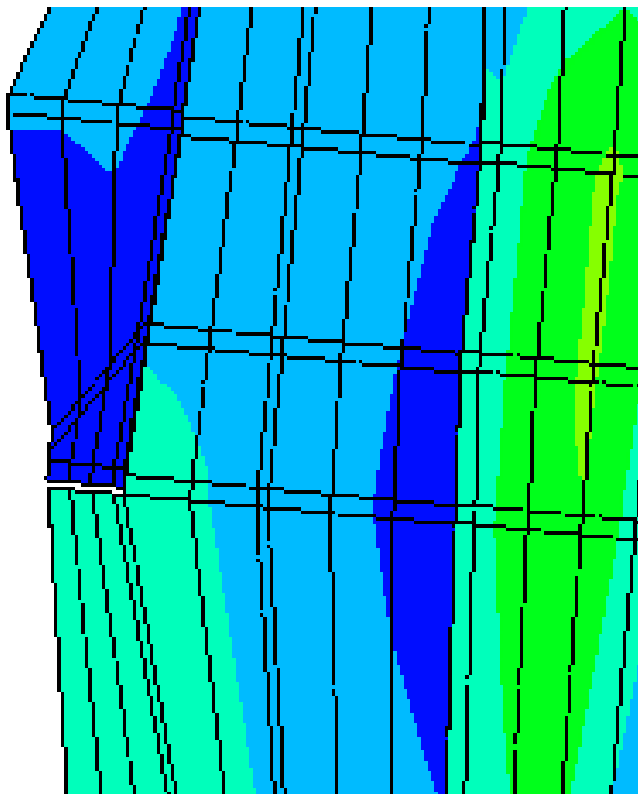
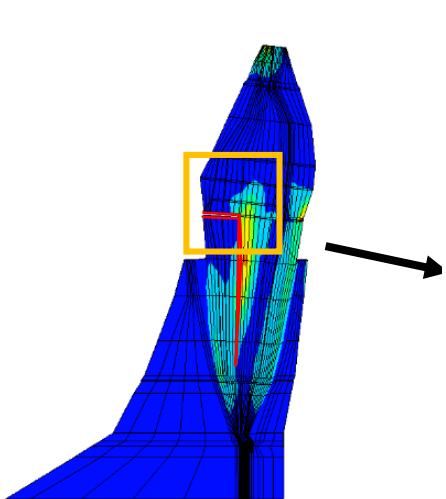


Before  
Adhesive failure

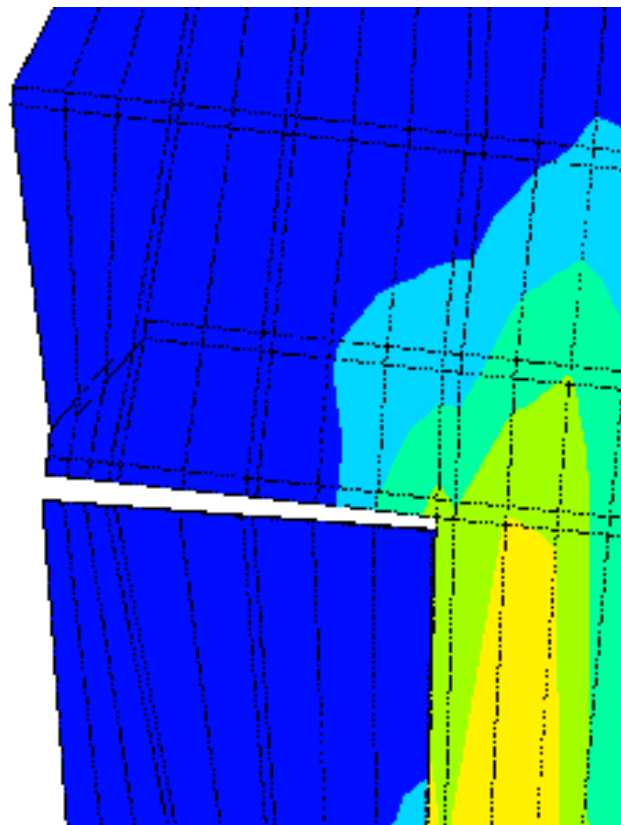


After  
Adhesive failure

Fig 5  
佐藤

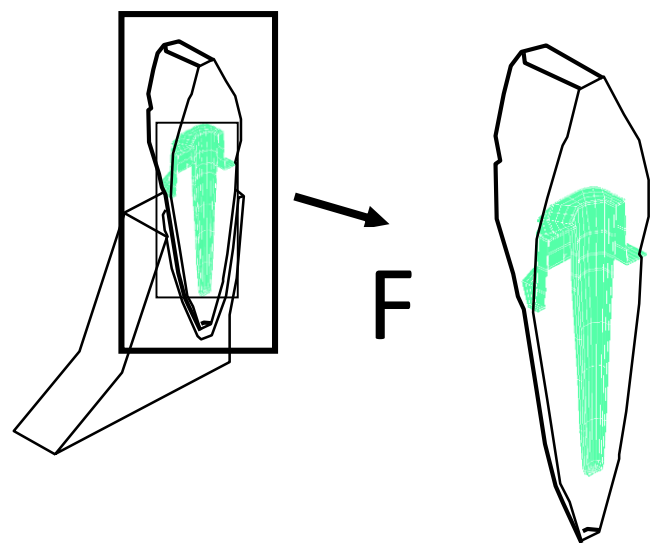


F

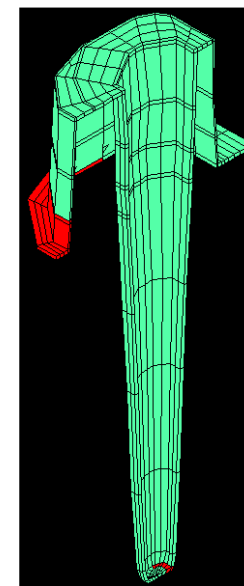
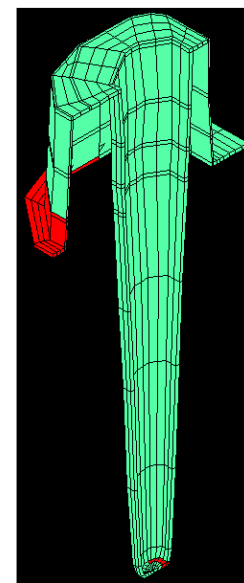
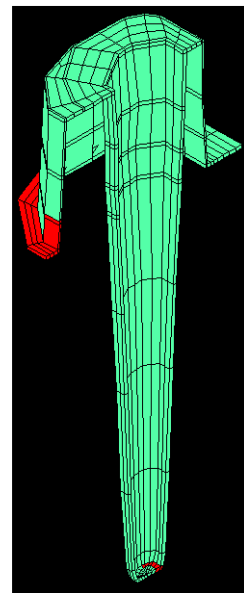
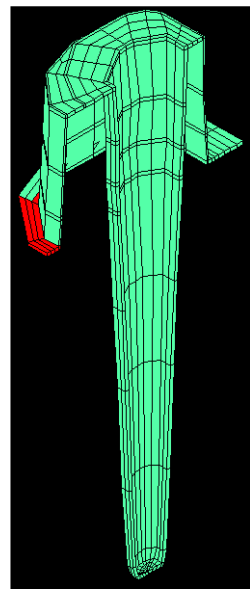
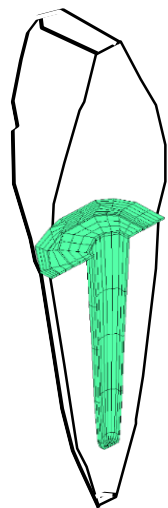


NF

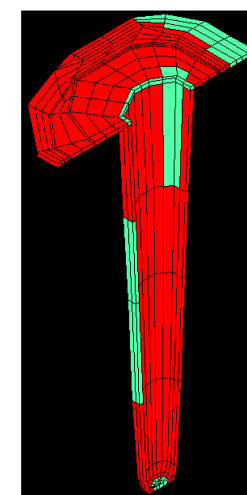
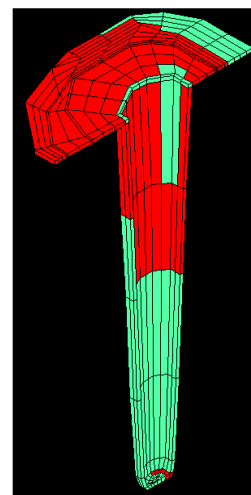
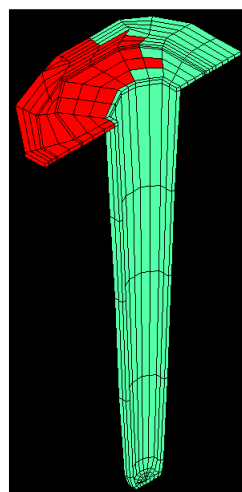
Fig 6  
佐藤



NF



Adhesion failed  
Adhesion continued



50 N

100 N

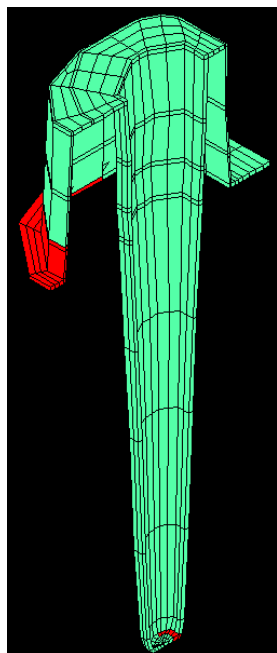
150 N

200 N

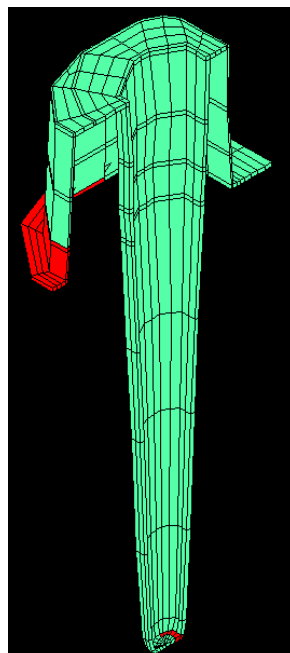


Fig 7  
佐藤

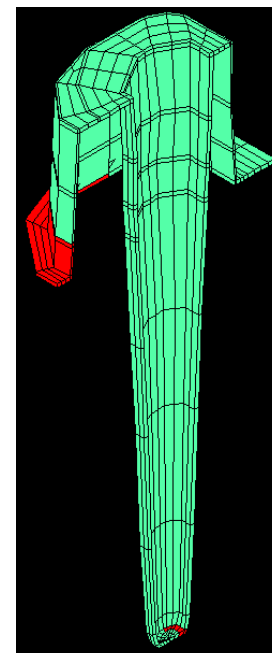
F



Without any  
prefabricated posts



With fiber post



With metal post

Adhesion failed  
Adhesion continued

NF

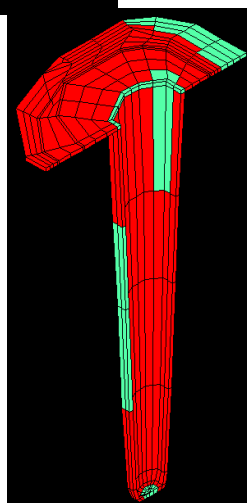
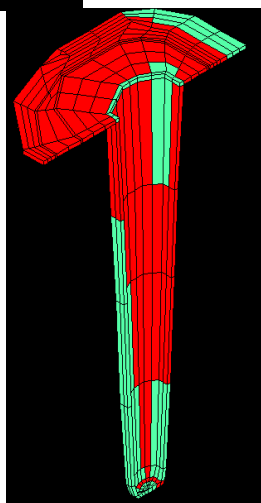


Fig 8  
佐藤

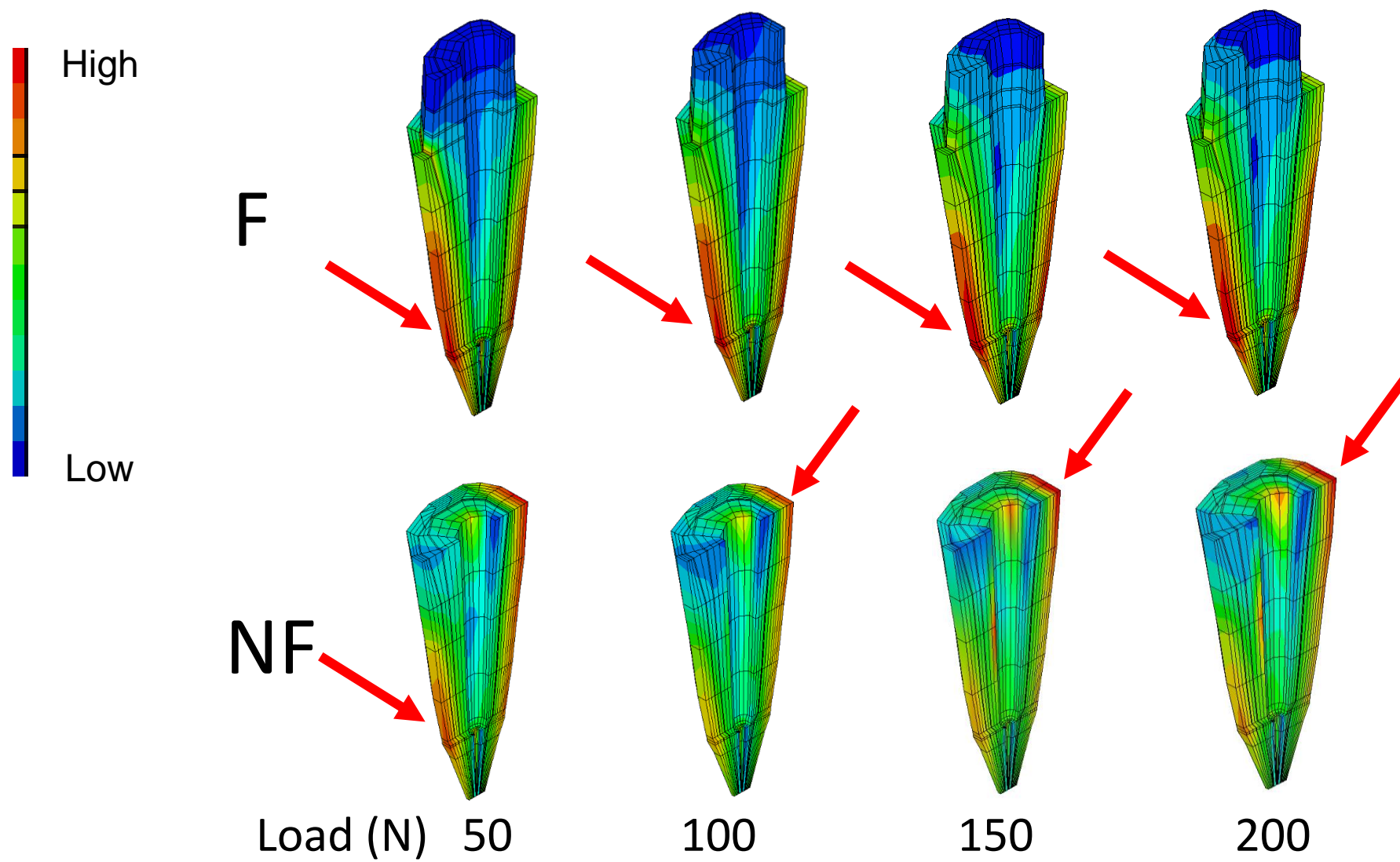


Fig 9  
佐藤

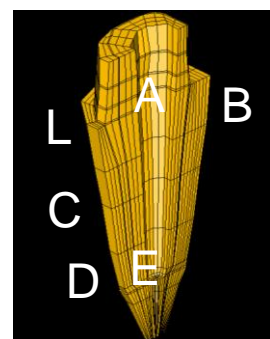
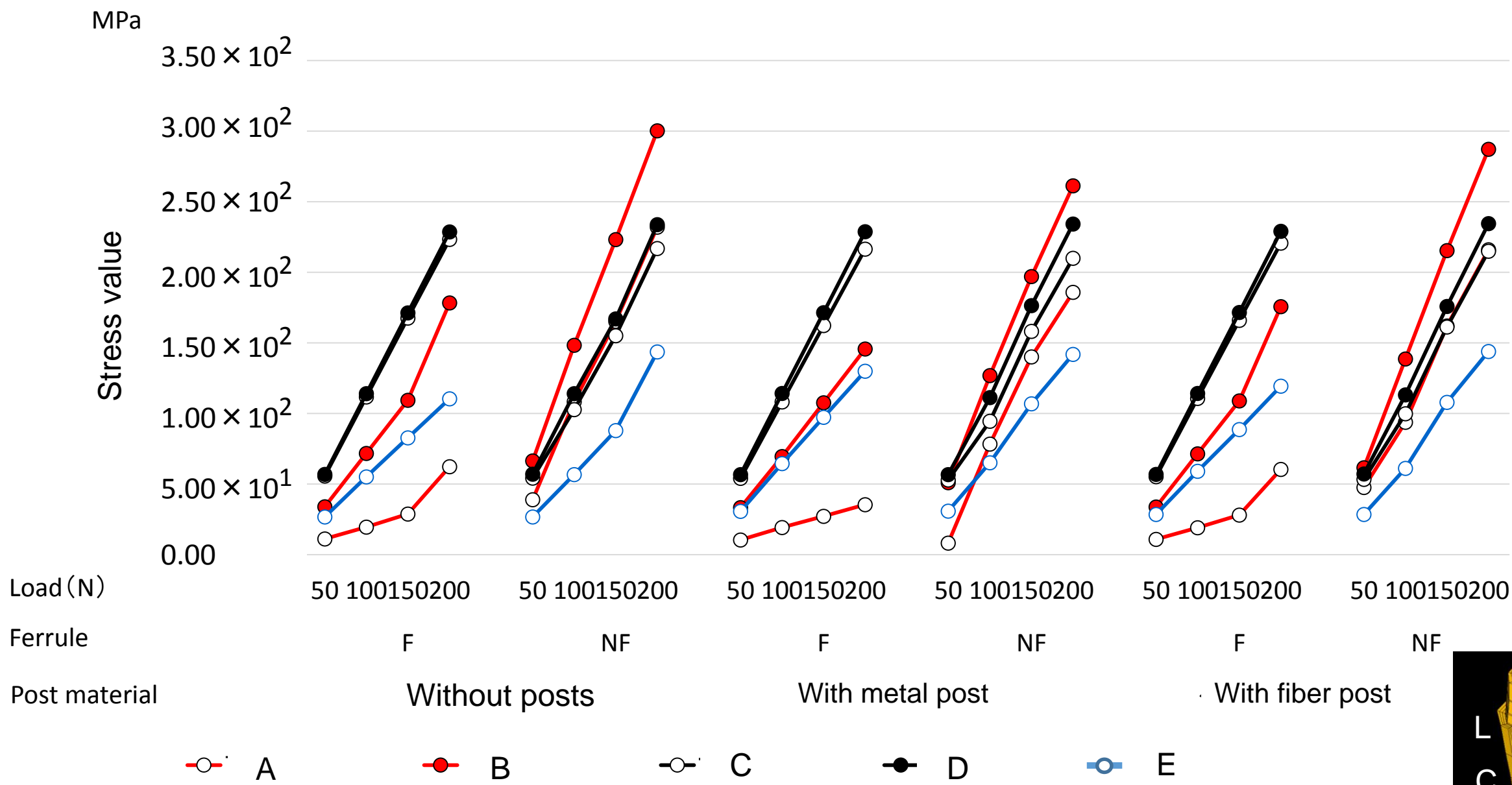
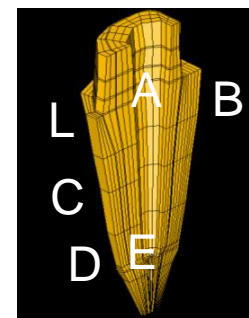
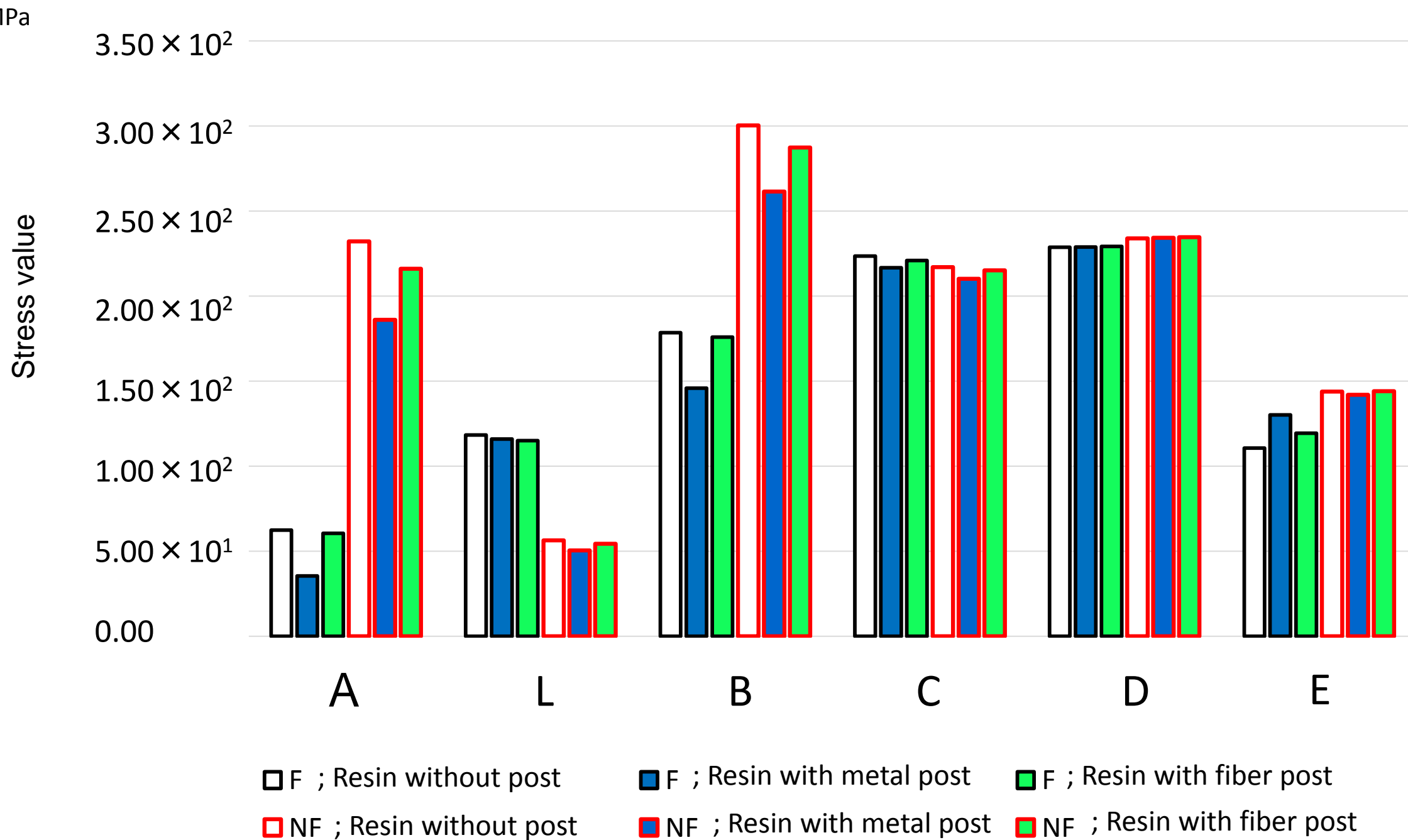


Fig 10  
佐藤



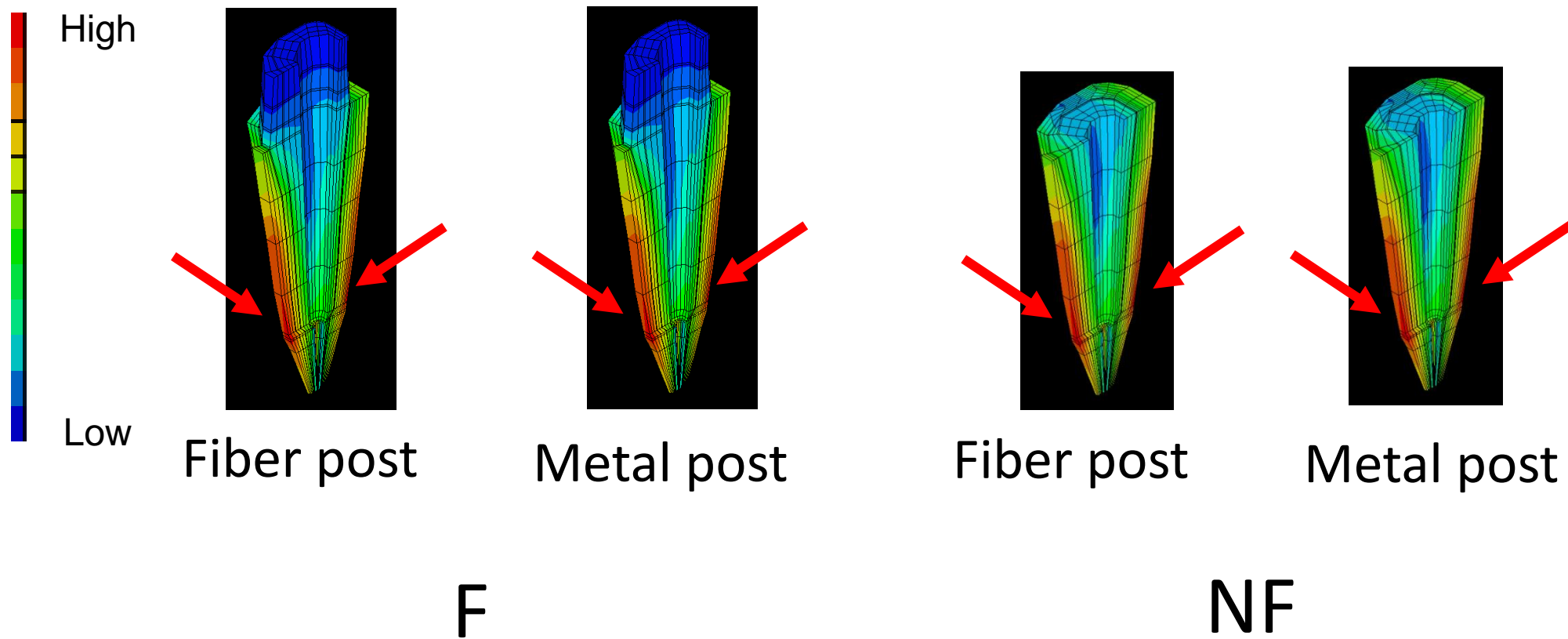


Table 1     Material properties used in finite element models

	Young's modulus (MPa)	Poisson's ratio
Dentin	$1.86 \times 10^4$	0.31
Composite resin	$1.66 \times 10^4$	0.24
Fiber post	$3.5 \times 10^4$	0.25
Stainless steel	$1.2 \times 10^5$	0.33
Porcelain	$6.9 \times 10^4$	0.28
Gold alloy	$9.5 \times 10^4$	0.33
Gutta percha	$6.9 \times 10^{-1}$	0.45
Periodontium	6.9	0.45
Cortical bone	$1.37 \times 10^4$	0.30
Sponge bone	$1.37 \times 10^3$	0.30